DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170996

李红军, 李佳珍, 雷玉平, 张玉铭. 无人机搭载数码相机航拍进行小麦、玉米氮素营养诊断研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170996
Li H J, Li J Z, Lei Y P, Zhang Y M. Diagnosis of nitrogen nutrition of winter wheat and summer corn using images from digital camera equipped on unmanned aerial vehicle[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170996

无人机搭载数码相机航拍进行小麦、玉米氮素营养诊断研究*

李红军[1], 李佳珍[1,2], 雷玉平[1], 张玉铭[1**]
(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室　石家庄　050022; 2. 中国科学院大学　北京　100049)

摘　要: 精准施肥是减少农业面源污染的重要技术之一, 而土壤养分测试与作物营养诊断是其实施的技术保障, 特别是在农业规模化经营方式下, 急需发展快速、经济、无损的作物氮素营养诊断技术。本文在应用数字图像进行冬小麦、夏玉米氮素营养诊断研究的基础上, 将数码相机搭载到无人机上, 利用无人机航拍技术采集作物冠层数字图像, 研究不同航拍高度下冠层图像相关色彩参数反演冬小麦和夏玉米氮素营养状态的差异, 以确定适宜的航拍高度与敏感的色彩参数, 建立利用无人机航拍数字图像诊断冬小麦和夏玉米氮素营养状态的模型。研究结果表明: 在冬小麦拔节期适宜的航拍高度是 16 m, 敏感的色彩参数是可见光大气阻抗植被指数(VARI), 诊断模型为: 冬小麦茎基部硝酸盐浓度=$2.103\ 4e^{18.874VARI}$; 夏玉米大喇叭口期适宜的航拍高度是 50 m, 敏感色彩参数是蓝光标准化值[B/(R+G+B)], 诊断模型为: 夏玉米第 1 完全展开叶叶脉硝酸盐浓度=$1.526\cdot10^{32}\cdot[B/(R+G+B)]^{50.445}$。依据建立的航拍方法与诊断模型, 分别对冬小麦、夏玉米进行了氮素状态监测的验证, 结果表明诊断结果与冬小麦、夏玉米实测数据的决定系数分别为 0.80 和 0.85, 且均在 $P<0.01$ 水平显著相关。最后将研究结果进行应用, 生成了冬小麦、夏玉米氮肥追肥作业图。利用无人机搭载数码相机对冬小麦、夏玉米进行氮素营养诊断简单、可行, 但仍有一些技术细节需要完善, 以提高该技术的实用性。

关键词: 精准施肥; 无人机; 数码相机; 色彩参数; 航拍高度; 硝酸盐浓度; 氮素营养诊断; 冬小麦; 夏玉米
中图分类号: S363　　**文献标识码:** A

Diagnosis of nitrogen nutrition of winter wheat and summer corn using images from digital camera equipped on unmanned aerial vehicle*

LI Hongjun[1], LI Jiazhen[1,2], LEI Yuping[1], ZHANG Yuming[1**]
(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The large number of population and scarce land resources require crop yield per unit area to be increased greatly to ensure the food supplies and food security in China. To meet this requirement, chemical fertilizer application is an important and simple measure. Consequently, the agricultural non-point pollution caused by chemical fertilizer is becoming more and more serious. Precision fertilization is one of the important technologies to control agricultural non-point source pollution, while soil nutrient testing and crop nutrition diagnosis are indispensable works of precision fertilization. With the increasing of agriculture scale management, it is urgent to develop fast, economic and nondestructive techniques of the nitrogen nutrition diagnosis of crops. In this study, in the light of related research of diagnosis of nitrogen nutrition in winter wheat and summer corn using digital photographs, cost-effective unmanned aerial vehicle (UAV) system was introduced and digital camera mounted on its platform was used to obtain the canopy photographs of crops. To determine the appropriate aerial heights and sensitive color parameters of aerial photographs for the diagnosis of nitrogen nutrition of winter wheat and summer corn, the relationships between a variety of color parameters retrieved

* 国家重点研发计划(2016YFD0200307)、河北省科技计划项目(14227423D)和渤海粮仓现代农业区域科技示范(KFJ-STS-ZDTP-001)资助
**通讯作者: 张玉铭, 研究方向为农田生态系统养分循环。E-mail: ymzhang@sjziam.ac.cn
李红军, 研究方向为精准农业技术研究与应用。E-mail: lhj@sjziam.ac.cn
收稿日期: 2017-10-15　接受日期: 2017-11-01
* This study was supported by the National Key Research and Development Plan of China (2016YFD0200307), the Science and Technology Plan Project of Hebei Province (14227423D) and the Science and Technology Demonstration of Modern Agriculture in Bohai Granary Region (KFJ-STS-ZDTP-001)。
**Corresponding author, E-mail: ymzhang@sjziam.ac.cn
Received Oct. 15, 2017; accepted Nov.1, 2017

from the aerial photographs obtained at different heights and the status of nitrogen nutrition of winter wheat and summer corn measured in situ in 2015 were analyzed. It was indicated that VARI (visible atmospherically resistant index based on digital photography) and B/(R+G+B) were the most sensitive color parameters for the diagnosis of nitrogen nutrition in winter wheat and summer corn, respectively. For the winter wheat, 16 m was the suitable aerial height at jointing stage, and the diagnosis model was: stem sap nitrate concentration = $2.103\ 4e^{18.874VARI}$。50 m was the best aerial height for summer corn at big trumpet stage, and the diagnosis model was: vein nitrate concentration = $1.526\cdot10^{32}\cdot [B/(R+G+B)]^{50.445}$. The established diagnose models were verified at the same field in 2016. The results showed that the determination coefficients of relationship between predicted and observed nitrate nitrogen concentrations of stem sap of winter wheat and vein of summer corn were 0.80 and 0.85, respectively, with significant levels of $P < 0.01$. In 2017, the method was applied to the diagnosis of nitrogen nutrition of winter wheat and summer corn in Nanpi County, Hebei Province, and the prescription maps of top-dressing nitrogen fertilizer for winter wheat and summer corn were made. The nitrogen fertilization rates of winter wheat and summer corn given by the prescription maps were fitting well with the growth status of crops. As shown in this study, diagnosis of nitrogen nutrition of winter wheat and summer corn using photographs from digital camera equipped on UAV was a cost-effective way to achieve precision management of fertilization. Beyond the achievements of this study, there were still problems should be solved to enhance the practicability and applicability of this method.

Keywords: Precision fertilization; Unmanned aerial vehicle (UAV); Digital camera; Color parameters; Aerial height; Nitrate nitrogen concentration; Diagnosis of nitrogen nutrition; Winter wheat; Summer corn

我国人多地少，要保证粮食供应必须提高作物单产，而施用化肥是提高作物产量的重要措施。近年来我国粮食产量的连续增长，在很大程度上依赖于化肥的施用[1]。较高的化肥用量和较低的养分利用率已经对环境产生了不良影响，粮食安全政策与农业面源污染的关系得到了广泛关注，为此，农业部提出了《到2020 年化肥使用量零增长行动方案》，其中精准施肥是重要技术之一[2]。实施精准施肥的前提是土壤养分测试与作物营养诊断。土壤养分测试技术相对成熟，农业部在全国范围内组织开展了测土配方施肥普及行动[3]。而在作物氮素营养诊断方面，传统的实验室方法虽然精准但费时费力，难以满足作物快速生长时期农田氮肥管理的需求。因此，发展快速、经济、无损的作物氮素营养诊断方法对于实现合理施用氮肥、提升作物品质、增加农民收入和减少面源污染都具有重要的应用价值。

作物氮素无损诊断随着相关技术的提高由定性或半定量逐渐向精准定量的方向发展，主要包括叶绿素仪、遥感技术、荧光诊断法和冠层色彩分析法等[4]。其中，冠层色彩分析法基于作物缺氮时叶色的变化来诊断其氮素营养状况。《沈氏农书》中就有关于根据水稻(*Oryza sativa*)叶色追施穗肥的记载。20 世纪 60 年代初，陶勤南等[5]通过比色卡的方法评价水稻叶色并对其黑黄变化的生理基础做了系列研究。近期随着数字照相技术的发展，冠层色彩分析法进入精准定量研究阶段，并在多种作物上得到应用。张立周等[6-7]基于养分定位试验研究了小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)冠层数字图像色彩参数与其传统氮素营养参数之间的关系，筛选出绿光标准化值和蓝光标准化值分别用于小麦和玉米的氮素营养诊断。王连君等[8]发现绿光/蓝光可用于葡萄(*Vitis vinifera*)氮素营养的诊断。魏全全等[9]采用冬油菜(*Brassica campestris*)冠层数字图像的红光标准化值对其氮素营养进行诊断。另外，数字图像氮素诊断技术在马铃薯(*Solanum tuberosum*)[10]、草莓(*Fragaria ananassa*)[11]、棉花(*Gossypium* spp.)[12]等多种作物上均得到研究和应用，充分显示该方法可以作为优化配方施肥的配套技术辅助实现氮肥的精准管理。

随着农村土地流转量的增加，农业适度规模经营成为新的趋势并在不断扩大，采用数字图像氮素诊断技术进行氮肥精准管理必须解决快速获取大范围作物冠层图像的问题。无人机技术的发展为低空遥感提供了可行的搭载平台。高林等[13]利用数码相机与旋翼无人机组成的遥感监测系统对冬小麦叶面积指数进行了准确估算。祝锦霞等[14]采用旋翼式无人航空摄影平台对水稻氮素营养诊断开展了研究。由于无人机遥感的高时效、高分辨率和低成本的特点，在田块尺度农情监测与决策方面具有很好的应用前景。低空对作物冠层航拍不同于地面拍照，在航拍高度、速度、数码相机拍照参数的确定上要力求图像清晰、拍照区域覆盖完整且不过于重叠、工作效率高效，在数字图像获取的航拍技术、氮素诊断指标筛选及图像处理技术上需要进一步的研究以满足实际生产的需求，而这方面的研究还很欠缺。

基于上述的研究基础和技术需求，本文利用无人机搭载数码相机对冬小麦、夏玉米冠层进行航拍，结合作物常规氮素分析，对航拍数字图像进行分析以确定适宜的航拍高度，筛选出敏感的色彩参数，实现对作物氮素营养状态的精准诊断，以期为规模化农业经营方式下农田氮肥的精准管理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1　大田试验设计

为了监测不同程度氮素短缺在冬小麦、夏玉米叶色上的反应差异，试验在长期肥料定位试验地中进行[6,15]。试验地位于中国科学院栾城农业生态系统试验站(37.88°N, 114.68°E)，该站属暖温带半湿润季风气候，代表华北平原北部典型潮褐土高产农业生态类型，种植制度以冬小麦-夏玉米轮作为主。肥料定位试验自1997年开始一直延续至今，冬小麦种植品种为‘科农199’，夏玉米品种为‘郑单958’，共设4个氮肥水平：0、200 kg(N)·hm^{-2}·a^{-1}、400 kg(N)·hm^{-2}·a^{-1}和600 kg(N)·hm^{-2}·a^{-1}；3个磷肥水平：0、32.5 kg(P)·hm^{-2}·a^{-1}和64 kg(P)·hm^{-2}·a^{-1}；2个钾肥水平：0和150 kg(K)·hm^{-2}·a^{-1}。试验采用正交不完全设计共16个处理，每个处理3次重复共计48个样区。为了避免磷肥严重短缺的影响，本研究选择施用磷肥的处理作为供试样地，共33个样区参与本试验的采样与分析。

1.2　无人机搭载相机与航拍方法

本研究采用大疆S900六悬翼无人机搭载尼康D7000数码相机进行冬小麦和夏玉米冠层的航拍。研究组自制了减震平台将数码相机搭载到无人机上，搭载平台如图1所示。为了减少无人机振动对成像效果的影响，在连接杆与无人机及平台的连接处均安装了减震球，以减少了振动传递。搭载平台均采用碳纤维材料，保证结构强度同时减少重量，避免额外负担降低无人机飞行时间。相机水平向下嵌入搭载平台，航拍时将其固定，避免滑动或掉落。由于相机不具备GPS模块，需要配备专用GPS接收器，在航拍时为相机提供经纬度位置信息，并将其记录在图像的EXIF信息中，以备后期图像处理时需要。

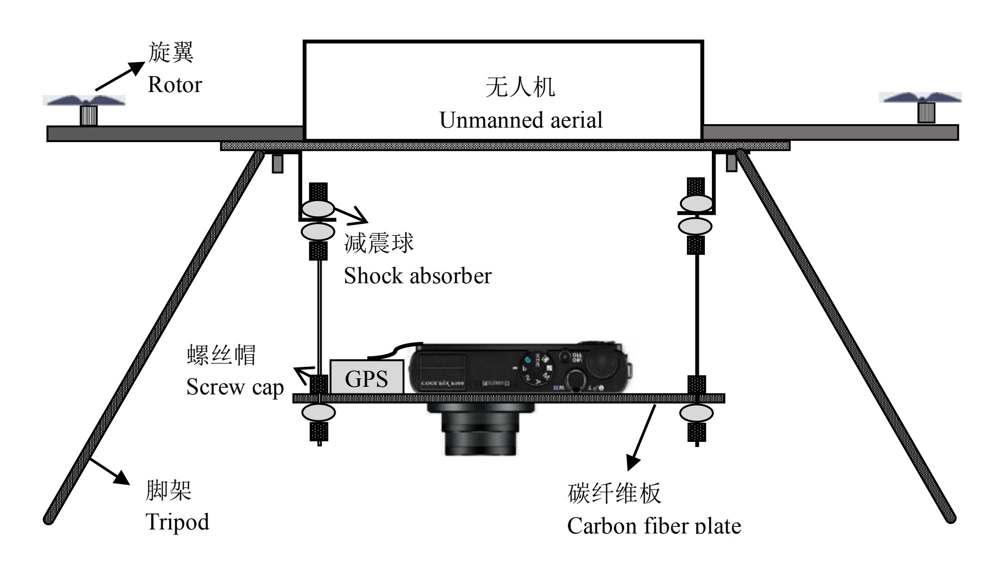


图1　无人机搭载数码相机平台结构图

Fig. 1　Structure diagram of unmanned aerial vehicle platform equipped with digital camera

无人机航拍时利用地面站软件规划好起落点、飞行轨迹、高度、上升和水平飞行速度等参数，然后上传到无人机飞控，实现在固定航线和高度上自动航拍。为了保持相机尽量水平获得正射图像，将水平飞行速度设定为3 m·s^{-1}。航拍选择在晴朗无云、风力较小的天气，时间在11:00—13:00，避免云和太阳光强变化对图像的影响。尼康D7000数码相机配备了18~300 mm f/3.5-5.6G镜头，航拍时将焦距设定为18 mm，以JPG格式保存图像。

本研究分别于2015年和2016年在肥料定位试验地进行航拍，2017年在南皮县进行了应用。其中，2015年数据用于筛选色彩参数建立诊断指标，2016年用于指标的验证。航拍时间选择在冬小麦拔节期(2015年4月9日和2016年4月8日)和夏玉米大喇叭口期(2015年7月28日和2016年7月22日)。为了研究不同高度下航拍图像对冬小麦、夏玉米氮素状态反演的差异，冬小麦航拍高度选择8 m、10 m、12 m、14 m、16 m和55 m，夏玉米航拍高度选择10 m、15 m、20 m和50 m。航拍时相机采用2 s间隔进行自动拍照，同时在定位试验设地置数字标牌，以便将图像与地面采样数据进行对应。2017年4月14日和7月27日，在河北省南皮县东五拨村(38.068°N, 116.825°E)分别对冬小麦和夏玉米地进行航拍，利用本研究建立的诊断方法进行氮肥追肥推荐，指导农户精准施肥。

1.3 常规作物氮素信息采集

对 33 个样区在航拍时同步测量作物氮素含量。利用 SPAD-502 叶绿素仪测量冬小麦第 1 完全展开叶的中部，每个样区测量 30 个叶片，取其平均值作为该区 SPAD 数值。采用反射仪和硝酸盐试纸测量冬小麦茎基部硝酸盐浓度(以下简称冬小麦茎基部酸盐浓度)。同样取夏玉米第 1 完全展开叶中部叶脉进行挤压汁液，采用同样的方法测量叶脉硝酸盐浓度(以下简称玉米叶脉硝酸盐浓度)。

1.4 冠层图像处理与参数分析方法

冠层图像通过红(R)、绿(G)、蓝(B)3 个色彩通道来反映作物叶片对光的反射特性，利用无人机搭载相机对作物进行航拍可以最大限度地获得顶部展开叶的信息。但是，由于光线遮挡等原因，图像中存在阴影、裸地、枯叶等非作物叶片信息，如果全幅图像均参与色彩参数分析，混入的干扰信息将影响到敏感参数的选择，因此需要通过一定的过滤通道将非作物叶片的像素剔除，以提高敏感色彩参数的筛选及诊断精度。

由 R、G、B 色彩通道相互组合可以衍生出多种色彩参数，如果都参与同常规氮素测量参数的相关性分析，工作量将是很大。参考相关研究[6-7,13]，同时考虑到比值型色彩参数对环境光线变化的消减作用，本研究通过初步筛选，选择红光标准化值[R/(R+G+B)]、绿光标准化值[G/(R+G+B)]、蓝光标准化值[B/(R+G+B)]以及可见光大气阻抗植被指数[(G−R)/(G+R−B)，VARI]作为备选指标，与同步测量的作物氮素指标进行相关性统计分析，以确定理想的航拍高度与诊断色彩参数。

2 结果与分析

2.1 非作物冠层像素剔除

航拍图像中非冬小麦、夏玉米叶片像素的存在会对参数选择及诊断造成干扰，分析时必须剔除，以保证只有作物叶片的色彩参数参与统计与分析。通过对冬小麦、夏玉米航拍图像中叶片及其他干扰地物色彩参数的分析，选择 G/(R+G+B)、R/(R+G+B)以及 R 共 3 个色彩参数通过阈值设定对图像进行过滤。过滤掉非叶片像素的规则是: G/(R+G+B)>0.37 AND R/(R+G+B)<0.42 AND R>20，其中 G/(R+G+B)与 R/(R+G+B)用于叶片像素的选择，R>20 用于过滤阴影。图 2 为冬小麦、夏玉米航拍图像与过滤后形成的掩膜图像对比，可见航拍图像中的裸地、标牌、杂物、阴影等都已经被剔除，这将提高后期图像色彩参数分析的准确性。

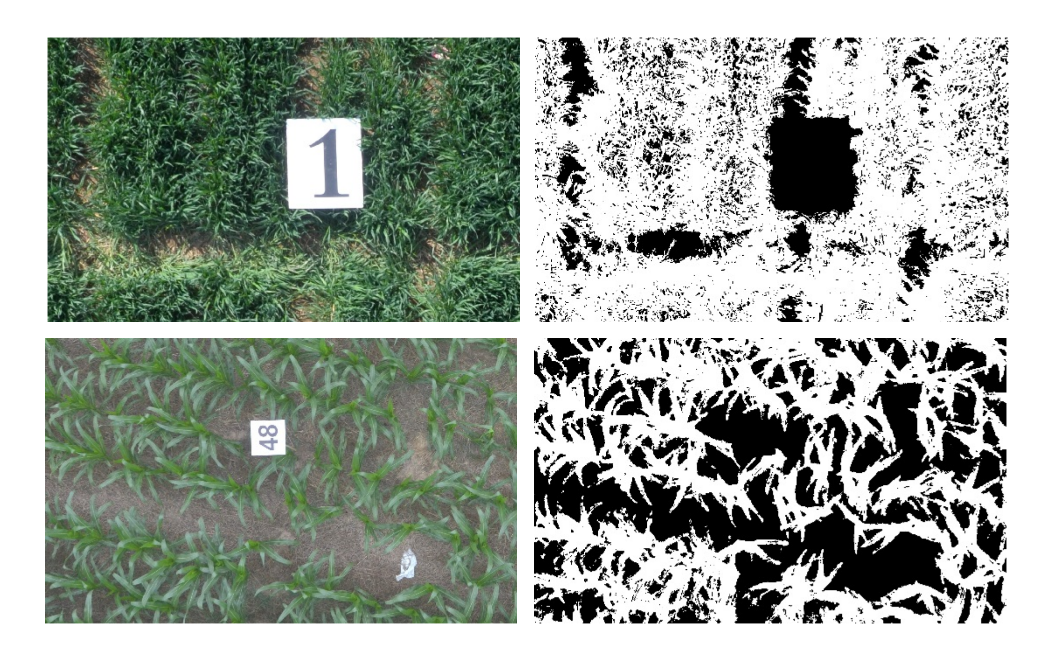


图 2 冬小麦和夏玉米航拍图像中非叶片像素剔除效果

Fig. 2 Comparison between aerial photographs of winter wheat and summer corn and their mask images

利用过滤非叶片像素生成的叶片掩膜文件(0 和 1 数值)和每个叶片像素的 3 个色彩通道数据，计算获得各像素的 R/(R+G+B)、G/(R+G+B)、B/(R+G+B)和 VARI。根据地面标牌号码识别每个样区的航拍图像，计算并统计出每个样区所有叶片的色彩参数获得平均值，与同步测量的冬小麦、夏玉米氮素状态信息进行分析，从中筛选适宜的航拍高度和敏感的色彩参数，建立诊断方程。

2.2 冬小麦氮素营养诊断分析

2.2.1 敏感参数选择

手持式叶绿素仪(SPAD-502)能够快速、简单、无损地测量植物的叶绿素相对含量，在小麦[16]、玉米[17]、棉花[18]、水稻[19]等作物的氮素诊断与推荐施肥上得到应用。本研究将不同航拍高度下冬小麦各样区的色彩参数与同步测量的 SPAD 数值进行相关性分析(图 3)。如图 3 所示，SPAD 值与各个备选色彩参数均呈明显的线性相关性，除与 R/(R+G+B)为负相关外，与其他 3 个备选色彩参数均为正相关性，经检验，相关性均在 $P<0.01$ 水平显著。SPAD 与 R/(R+G+B)、G/(R+G+B)、B/(R+G+B)以及 VARI 的相关决定系数(R^2)分别是 0.926 9、0.306 2、0.792 9 和 0.898 9。SPAD 与 R/(R+G+B)相关性最好，其次为 VARI。

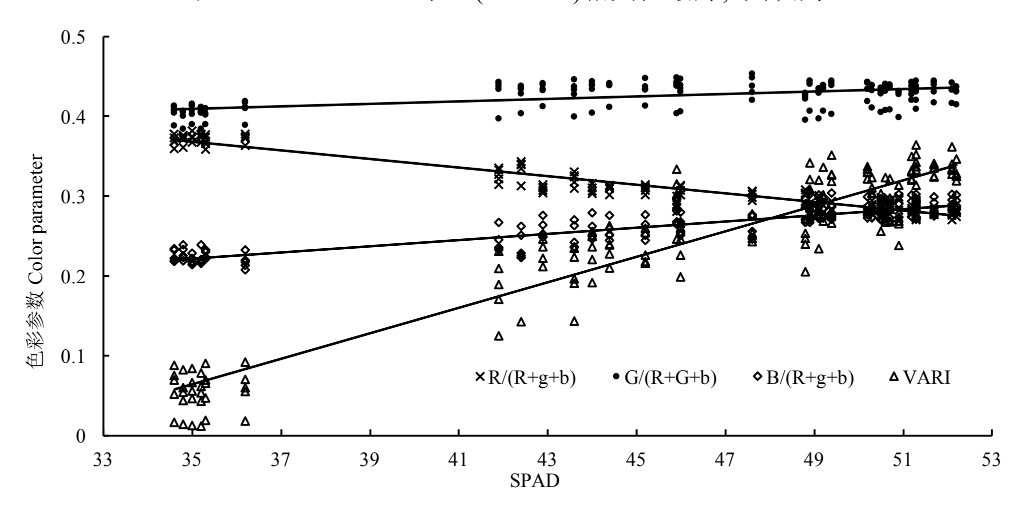


图 3　各样区冬小麦冠层图像色彩参数与叶片 SPAD 的相关性

Fig. 3　Correlation between canopy photograph color parameters and leaves SPAD of winter wheat

SPAD 数值易受到多种因素的影响，且存在饱和现象[20]，难以实现对作物氮素营养的高精度诊断。因此，本研究采用冬小麦茎基部硝酸盐浓度与各备选色彩参数做进一步相关性分析，以筛选出诊断冬小麦氮素营养状态的最敏感的色彩参数。如图 4 所示，不同航拍高度获得的冬小麦冠层色彩参数与冬小麦茎基部硝酸盐含量均呈幂函数相关关系，且 R/(R+G+B)相关性最好，决定系数为 0.78，其次为 B/(R+G+B)和 VARI，其决定系数均为 0.76。参考各备选参数与 SPAD 的相关性分析，可以认为 R/(R+G+B)是反应作物氮素状态的最敏感参数，其次为 VARI。R/(R+G+B)的取值范围是从 0.27 到 0.38(表 1)，数值变程为 0.11，而 VARI 的取值范围从 0.01 到 0.36，数值变程为 0.35。从反演作物氮素模型的鲁棒性考虑，R/(R+G+B)的变异系数为 0.11，数据离散度太低，不确定性较高，容易导致异常值的出现，而 VARI 的变异系数为 0.39，不确定性要远低于 R/(R+G+B)。在与冬小麦叶片 SPAD 及茎基部硝酸盐含量的相关决定系数上，VARI 略低于 R/(R+G+B)，综合考虑色彩参数的不确定性，VARI 更适合作为监测冬小麦氮素营养状态的色彩参数。

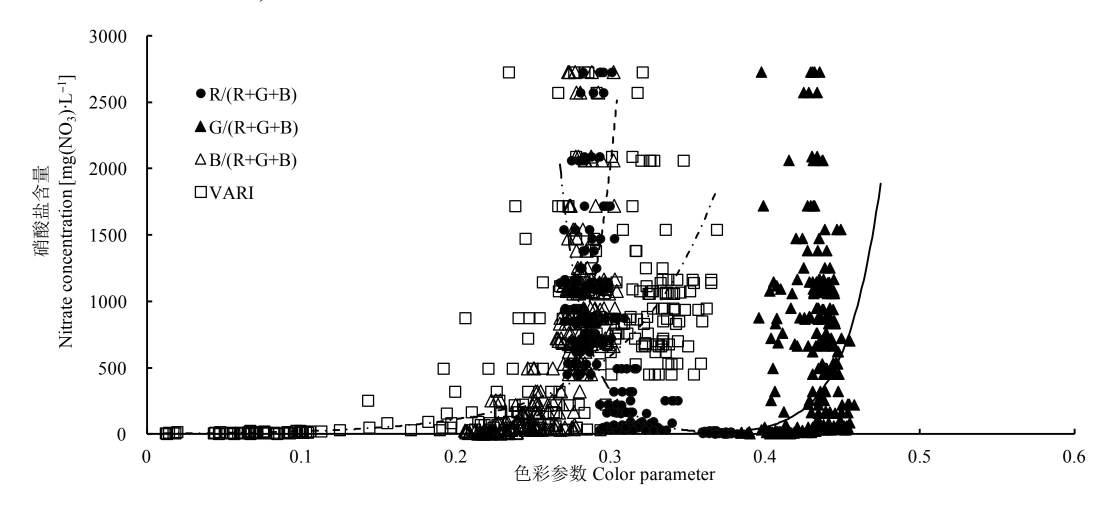


图 4　各样区冬小麦冠层图像色彩参数与冬小麦茎基部硝酸盐浓度的相关性

Fig. 4 Correlation between canopy photograph color parameters and stem sap nitrate concentration of winter wheat

表 1 冬小麦茎基部硝酸盐浓度与各色彩参数统计分析

Table 1 Statistic analysis of stem sap nitrate concentration and color parameters of winter wheat and their correlations

色彩参数 Color parameter	R^2	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变幅 Amplitude
R/(R+G+B)	0.80^{**}	0.27	0.38	0.11
G/(R+G+B)	0.22^{**}	0.38	0.45	0.07
B/(R+G+B)	0.74^{**}	0.21	0.3	0.10
VARI	0.78^{**}	0.01	0.36	0.35

表示在 P<0.01 水平显著相关。 means significant relationship at $P < 0.01$.

2.2.2 适宜航拍高度的确定

无人机在不同高度对冬小麦进行航拍时受图像分辨率、观测角度等因素的影响，会导致图像色彩参数的变化。为研究不同高度航拍图像对冬小麦氮素营养状态监测的差异，在其他条件(如相机设置、无人机飞行速度等)均相同的条件下，分别在 8 m、10 m、12 m、14 m、16 m 和 55 m 高度对冬小麦进行航拍，然后提取各样区的 VARI 数值与同步观测的冬小麦茎基部硝酸盐浓度进行相关性分析，结果见图 5。冬小麦茎基部硝酸盐浓度与不同高度航拍图像提取出的 VARI 均呈明显的指数相关关系，并且拟合的指数函数曲线较为接近。冬小麦茎基部硝酸盐浓度与 8 m、10 m、12 m、14 m、16 m 和 55 m 处 VARI 的相关决定系数分别是 0.84、0.84、0.80、0.84、0.82 和 0.78，在 8~16 m 航拍高度 VARI 对冬小麦氮素营养的反应差异较小，而在 55 m 高度二者的相关性明显降低。因此, 8~16 m 均可作为冬小麦航拍氮素诊断的适宜高度。从航拍作业的安全性考虑，建议采用 16 m 的航拍高度，这样可以避开地面树木、电杆等物体的影响，方便作业。

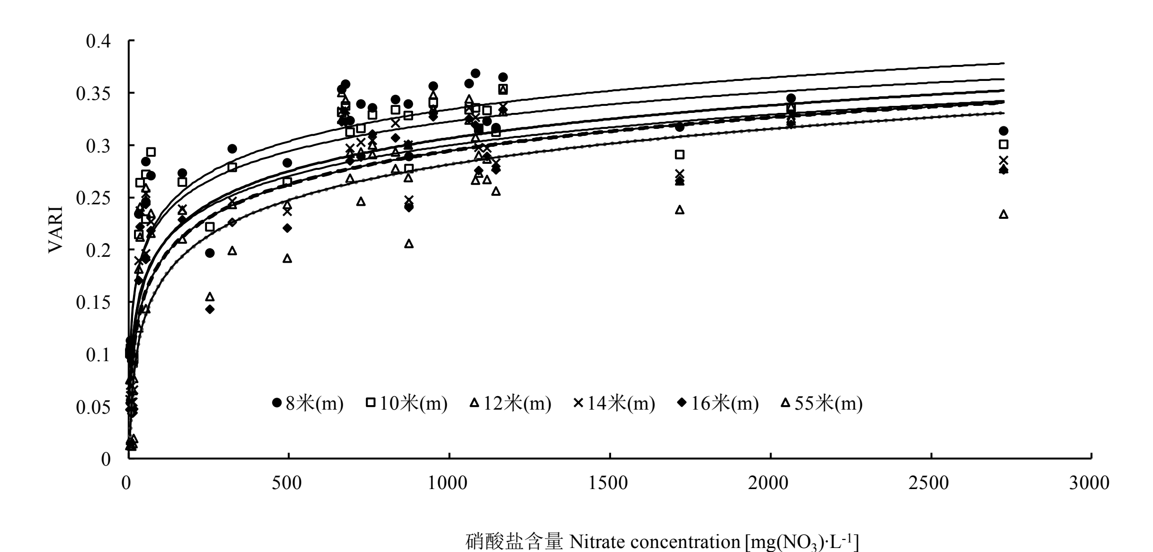


图 5 不同航拍高度航拍冬小麦冠层图像色彩参数 VARI 与茎基部硝酸盐含量相关性的比较

Fig. 5 Comparison of relationships between stem sap nitrate concentration and VARI of aerial photographs of winter wheat obtained at different heights

2.2.3 冬小麦氮素诊断指标确定

鉴于 8~16 m 均适宜作为冬小麦的航拍高度，各航拍高度下 VARI 数值相近且与冬小麦茎基部硝酸盐浓度都具有较好的相关性，本研究将 8~16 m 航拍高度下获得的各样区的 VARI 数值进行平均，然后与同步观测的冬小麦茎基部硝酸盐浓度进行相关性回归建模，以获得利用航拍图像反演冬小麦氮素营养状态的诊断模型，如图 6 所示。VARI 平均值与冬小麦茎基部硝酸盐浓度具有较好的指数相关性，据此获得冬小麦航拍氮素营养诊断方程：冬小麦茎基部硝酸盐浓=2.103 4$e^{18.874VARI}$。

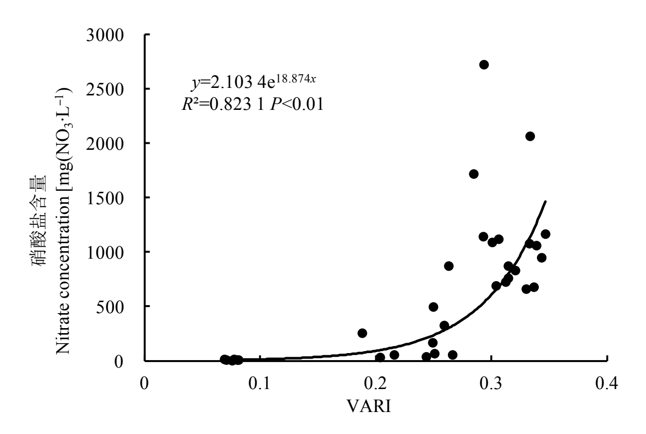


图 6　不同高度(8~16 m)航拍冬小麦冠层图像 VARI 与茎基部硝酸盐浓度的指数模型

Fig. 6　Exponential model build by average VARI of aerial photographs from different aerial heights and stem sap concentration of winter wheat

利用航拍图像的 VARI 反演获得冬小麦茎基部硝酸盐浓度后，可以冬小麦茎基部硝酸盐浓度为依据，结合目标产量，根据氮素平衡原理计算不同 VARI 对应的氮肥追肥量[21]，实现氮肥的精准管理。表 2 为依据 VARI 指标计算的不同产量目标下冬小麦的氮肥追肥量。

表 2　不同冠层图像 VARI 及产量目标下冬小麦氮肥追肥量参考指标

Table 2　Recommended winter wheat topdressing amount of nitrogen fertilizer under different VARIs of aerial photographs and yield targets of winter wheat

VARI	<0.2901	0.2901~0.3116	0.3116~0.3269	0.3269~0.3387	0.3387~0.3484	>0.3484
营养状况 Nitrogen nutrition status	极低 Very low	低 Low	中 Moderate	高 High	较高 Higher	极高 Very high
目标产量 Yield target ($t \cdot hm^{-2}$)	推荐追氮量 Recommended topdressing amount of nitrogen fertilizer [kg(N) $\cdot hm^{-2}$]					
7.50~8.25	178	139~178	99~139	60~99	21~60	21
6.75~7.50	162	126~162	90~126	55~90	19~55	19
6.00~6.75	153	119~153	84~119	50~84	17~50	17
5.25~6.00	146	114~146	81~114	50~81	15~50	15
4.50~5.25	104	80~104	56~80	31~56	7~31	7

2.3　夏玉米氮素营养诊断分析

在夏玉米大喇叭口期选择 10 m、15 m、20 m 和 50 m 分别进行航拍，研究不同高度下各备选色彩参数对夏玉米氮素营养状态反映的差异，以确定敏感的色彩参数及适宜的航拍高度。同样采用掩膜的方法剔除非叶片像素，统计出不同航拍高度下各个样区的 R/(R+G+B)、G/(R+G+B)、B/(R+G+B)以及 VARI，与同步测量的夏玉米叶脉硝酸盐浓度进行相关性分析，以确定最为敏感的色彩参数及适宜的航拍高度，统计数据见表 3。

表 3　不同航拍高度下夏玉米冠层图像色彩参数与叶脉硝酸盐浓度的关系

Table 1　Relationship analysis between color parameters of aerial photographs obtained at different heights and vein nitrate concentration of summer corn

航拍高度 Aerial photography height (m)	R/(R+G+B)		G/(R+G+B)		B/(R+G+B)		VARI	
	拟合方程 Fitted equation	决定系数 R^2	拟合方程 Fitted equation	决定系数 R^2	拟合方程 Fitted equation	决定系数 R^2	拟合方程 Fitted equation	决定系数 R^2
10	$y=0.000\ 5x^{-12.43}$	0.14	$y=7.4\cdot10^{10}\cdot x^{-12.43}$	0.09	$y=61.664e^{9.7x}$	0.02	$y=1.67\cdot10^{6}\cdot x^{5.07}$	0.30*
15	$y=1.28\cdot10^{-8}\cdot x^{21.87}$	0.24*	$y=1.39\cdot10^{7}\cdot x^{11.55}$	0.02	$y=5.69\cdot10^{6}\cdot x^{6.5}$	0.07	$y=2.02\cdot10^{7}\cdot x^{6.42}$	0.35*
20	$y=1.6\cdot10^{-17}\cdot x^{39.91}$	0.42**	$y=1.37\cdot10^{-1}\cdot x^{-9.61}$	0.01	$y=1.34\cdot10^{10}\cdot x^{12.7}$	0.18	$y=1.49\cdot10^{11}\cdot x^{11.47}$	0.59**

50	y=3.6·10^28^·$x^{62.92}$	0.67**	y=4.32·10^37^·$x^{-9.61}$	0.24**	y=1.526·10^32^·$x^{50.4}$	0.92**	y=3.90·10^8^·$x^{5.96}$	0.50**

x 是色彩参数, *y* 是夏玉米叶脉硝酸盐浓度[mg(NO$_3$)·L^{-1}]。*和**分别表示在 P<0.05 和 P<0.01 水平显著相关。*x* is color parameter, *y* is vein nitrate concentration [mg(NO$_3$)·L^{-1}]. * and ** mean significantly relationship at P < 0.05 and P < 0.01, respectively.

统计分析显示不同航拍高度下同一个色彩参数与夏玉米叶脉硝酸盐浓度的相关性存在较大差异，这意味着从不同高度下拍摄的图像其色彩参数存在变化，引起的原因可能是图像分辨率以及拍摄角度不同捕获的夏玉米冠层的变化，具体原因需要做进一步的分析。在诸多拟合方程中，50 m 高度航拍图像的 B/(R+G+B)与夏玉米叶脉硝酸盐浓度拟合方程的决定系数最高(0.92)，在 P<0.01 水平下显著相关。因此，选择 50 m 作为夏玉米的适宜航拍高度，以 B/(R+G+B)作为反映夏玉米氮素营养状态的最敏感参数，诊断方程为：夏玉米叶脉硝酸盐浓度=1.526·10^{32}·[B/(R+G+B)]$^{50.445}$。利用航拍图像反演获得夏玉米叶脉硝酸盐浓度后，参考夏玉米常规氮肥追肥诊断方法[22]，可以实现依据航拍图像 B/(R+G+B)参数进行夏玉米氮肥追肥量的估算(见表 4)，实现夏玉米氮肥追肥的精准管理。

表 4　不同夏玉米冠层图像色彩参数[B/(R+G+B)]下氮肥追肥量参考指标(目标产量为 7~8 t·hm^{-2})

Table 3　Recommended topdressing amount of nitrogen fertilizer under different B/(R+G+B) of aerial photographs obtained at 50 m high of summer corn with yield target of 7~8 t·hm^{-2}

B/(R+G+B)	<0.2606	0.2606~0.2626	0.2626~0.2639	0.2639~0.2650	0.2650~0.2658	0.2658~0.2666	0.2666~0.2672	>0.2672
推荐施氮量 Recommended amount of nitrogen fertilizer [kg(N) ·hm^{-2}]	250	200~250	150~200	100~150	60~100	30~60	0~30	0

2.4　诊断指标验证

为验证诊断模型的精度，2016 年 4 月 8 日和 7 月 22 日在肥料定位试验地对冬小麦和夏玉米分别以 16 m 和 50 m 的高度进行航拍，利用冠层图像对作物氮素营养状态进行反演，同时测量相同样点冬小麦茎基部和夏玉米叶脉的硝酸盐浓度。冬小麦和夏玉米氮素营养状态的实测值与预测值比较如图 7 所示。2016 年利用航拍图像反演的冬小麦和夏玉米氮素状态与实测数据具有很好的拟合精度，反演与实测的冬小麦茎基部硝酸盐浓度决定系数为 0.80，在 P<0.01 水平显著相关；夏玉米叶脉硝酸盐浓度的决定系数为 0.85，同样在 P<0.01 水平显著相关。结果表明本研究所建立的冬小麦和夏玉米氮素营养诊断指标可行。

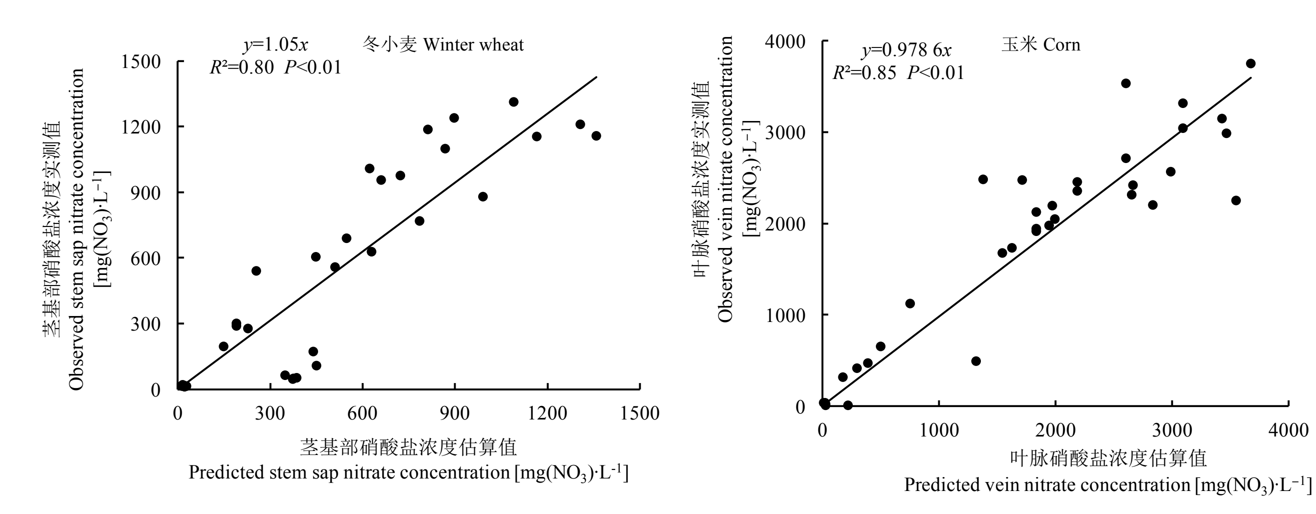


图 7　冬小麦、夏玉米氮素营养航拍诊断精度

Fig. 7　Verification of nitrogen nutrition diagnosis using aerial photographs of winter wheat and summer corn

2.5 无人机航拍氮素营养诊断应用

利用上述研究建立的航拍方法及诊断模型，2017 年在河北省沧州市南皮县东五拨村(38.068°N, 116.825°E)约 30 hm^2 的平整农田进行了航拍氮素营养诊断应用。选择在冬小麦拔节期和夏玉米大喇叭口期

进行航拍作业，通过软件开发建立了图像诊断批处理系统，实现航拍图像经纬度、叶片掩膜、色彩参数以及氮肥追肥量的快速批量处理，满足农田管理需求。利用航拍诊断的结果，通过反距离加权插值法获得每个田块的氮肥追肥量，为便于作业，以尿素为例，给出了氮肥追肥作业图。图 8 中白点为航拍图像的位置轨迹，长条为地块。经过地面调查和农户走访，作业图给出的氮肥追肥量高低与作物长势强弱在空间分布上较为吻合。

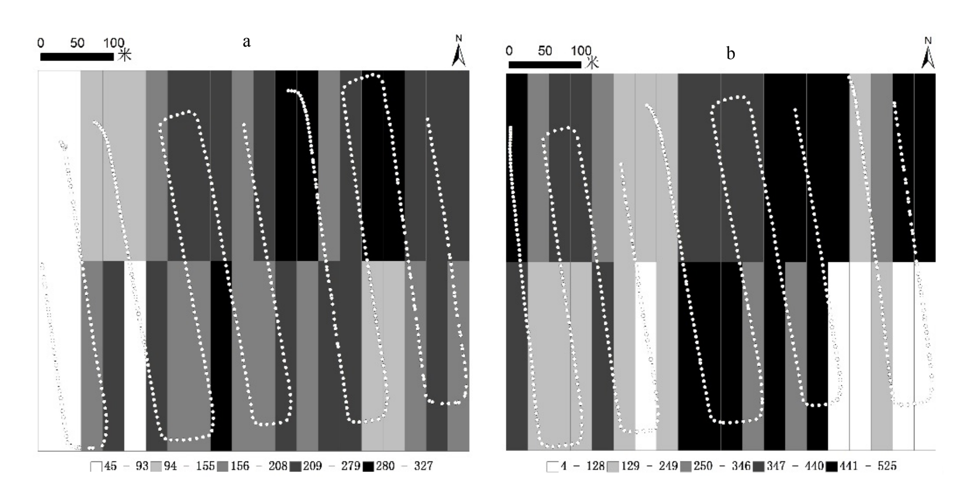


图 8 基于航拍图像诊断的冬小麦(a)、夏玉米(b)氮肥追肥施肥量[kg(尿素)·hm^{-2}]

Fig. 8 Prescription maps of top-dressing nitrogenous fertilizer amounts [kg(urea)·hm^{-2}] for winter wheat (a) and summer corn (b) by aerial photograph diagnosis

3 讨论与结论

解决农业生产对化肥的依赖以及由此造成的面源污染等问题，实现化肥施用量零增长的目标，需要切实可行的作物养分诊断与施肥技术，特别是对氮素的快速、无损、低成本诊断技术。叶色诊断方法简单易行，并且一直以来就被我国农民所采用，但过于定性且依靠个人经验。数码相机的采用使得可以应用数字图像技术，定量分析作物叶片对红光、蓝光和绿光的吸收差异，进而追溯引起该差异的氮素丰缺原因，实现氮素营养无损、低成本的定量化分析和决策[23]。随着土地流转和农业适度规模经营已成为趋势，必须满足大面积生产对氮素诊断的需求，即使采用数字图像诊断方法，拍照的工作量也是很大，特别是玉米等高秆作物，难以进入农田进行大量拍照。

面对新的生产需求，本研究基于数字图像诊断方法的研究基础，利用无人机航拍技术，自制了数码相机搭载平台，通过航线制定和自动航拍，解决了作物冠层图像快速获取问题。针对冬小麦和夏玉米，在适宜航拍高度以及对作物氮素营养敏感色彩参数的筛选上进行了深入研究。结果表明：在 8~16 m 高度冬小麦航拍图像的 VARI 对其氮素营养均很敏感，考虑到航拍安全，建议冬小麦采用 16 m 的航拍高度；不同航拍高度下夏玉米图像的色彩参数对其氮素营养的敏感性存在较大差异，50 m 高度航拍图像的 B/(R+G+B)与夏玉米叶脉硝酸盐浓度相关性最好，可以作为航拍诊断的依据。基于上述分析，2016 年进行了验证，结果表明航拍诊断模型在冬小麦和夏玉米上均有较好的监测精度。

相对于传统氮素化验分析方法，数字图像诊断法更为便捷，但要实现在生产中的成熟应用，还要做进一步的深入研究和技术完善。就本研究而言，仅对长期肥料定位试验下的单一品种进行了分析，品种间的叶色差异需要考虑；本文采用比值型色彩参数来消除光线对成像色彩的影响，王娟等[24]利用灰板校正以消除棉花不同生育期图像颜色特征值的亮度差异来提高诊断植株含水量的精度，该方法可以参考。另外，干旱能够引起作物叶色和植株硝酸盐浓度的变化，这将如何影响航拍图像诊断精度，色彩参数是否存在饱和现象等，这些问题将作为本研究的后续工作的重点内容，以进一步完善无人机航拍氮素诊断方法，并在其他作物上得到应用，促进精准施肥工作的开展。

参考文献 References

[1] 朱兆良，金继运．保障我国粮食安全的肥料问题[J]．植物营养与肥料学报，2013, 19(2): 259−273

Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition & Fertilizer Science, 2013, 19(2):259–273
[2] 农业部. 到2020年化肥使用量零增长行动方案[J]. 青海农技推广, 2015, (2): 3–5, 11
Minstry of Agriculture of China. The action plan for zero-growth of fertilizer use by 2020[J]. Qinghai Agricultural Technology Promotion, 2015, (2): 3–5, 11
[3] 龙新. 农业部今年开展测土配方施肥普及行动[J]. 农村工作通讯, 2010, (5): 29
Long X. Ministry of Agriculture carried out the action of soil testing and fertilizer recommendation this year[J]. Rural Work Communication, 2010, (5): 29
[4] 李桂娟, 朱丽丽, 李井会. 作物氮素营养诊断的无损测试研究与应用现状[J]. 黑龙江农业科学, 2008, (4): 127–129
Li G J, Zhu L L, Li J H. Present status of research and application of non-destructive measurement of nitrogen nutrition diagnosis[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2008, (4): 127–129
[5] 陶勤南, 方萍, 吴良欢, 等. 水稻氮素营养的叶色诊断研究[J]. 土壤, 1990, (4): 190–193, 197
Tao Q N, Fang P, Wu L H, et al. Study on the nitrogen nutrition diagnosis of rice using leaf color[J]. Soil, 1990, (4): 190–193, 197
[6] 张立周, 王殿武, 张玉铭, 等. 数字图像技术在夏玉米氮素营养诊断中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1340–1344
Zhang L Z, Wang D W, Zhang Y M, et al. Diagnosis of N nutrient status of corn using digital image processing technique[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(6): 1340–1344
[7] 张立周, 侯晓宇, 张玉铭, 等. 数字图像诊断技术在冬小麦氮素营养诊断中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1168–1174
Zhang L Z, Hou X Y, Zhang Y M, et al. Diagnosis of the state of N in wheat via digital image processing technique[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1168–1174
[8] 王连君, 宋月. 应用数字图像技术对葡萄进行氮素营养诊断的研究[J]. 农业科技通讯, 2017, (7): 186–189
Wang L J, Song Y. Study on the nitrogen nutrition diagnosis of grape using digital image processing technique[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, (7): 186–189
[9] 魏全全, 李岚涛, 任涛, 等. 基于数字图像技术的冬油菜氮素营养诊断[J]. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3877–3886
Wei Q Q, Lan tao L I, Ren T, et al. Diagnosing nitrogen nutrition status of winter rapeseed via digital image processing technique[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(19): 3877–3886
[10] 李井会, 朱丽丽, 宋述尧. 应用数字图像技术进行马铃薯氮素营养诊断的研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(6): 3303–3305
Li J H, Zhu L L, Song S Y. Diagnosis of N status of potato using digital image processing technique[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2012, 40(6): 3303–3305
[11] 王连君, 邢宇. 数字图像技术在草莓氮素营养诊断中的应用研究[J]. 华南农业大学学报, 2010, 31(2): 19–21
Wang L J, Xing Y. Study on strawberry of N nutrition diagnosis using digital image processing technique[J]. Journal of South China Agricultural University, 2010, 31(2): 19–21
[12] 王娟, 雷咏雯, 张永帅, 等. 应用数字图像分析技术进行棉花氮素营养诊断的研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 145–149
Wang J, Lei Y W, Zhang Y S, et al. Diagnosis of cotton N status using digital image analysis technique[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(1): 145–149
[13] 高林, 杨贵军, 李红军, 等. 基于无人机数码影像的冬小麦叶面积指数探测研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(9): 1254–1264
Gao, L, Yang G J, Li H J, et al. Winter wheat LAI estimation using unmanned aerial vehicle RGB-imaging[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(9): 1254–1264.
[14] 祝锦霞, 陈祝炉, 石媛媛, 等. 基于无人机和地面数字影像的水稻氮素营养诊断研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2010, 36(1): 78–83
Zhu J X, Chen Z L, Shi Y Y, et al. Diagnoses of rice nitrogen status based on spectral characteristics of leaf and canopy[J]. Journal of Zhejiang University: Agricutlure and Life Science, 2010, 36(1): 78–83
[15] 李红军, 张立周, 陈曦鸣, 等. 应用数字图像进行小麦氮素营养诊断中图像分析方法的研究[J]. 中国生态农业学报, 2011,

19(1): 155–159
Li H J, Zhang L Z, Chen X M, et al. Image analysis method in application of digital image on diagnosing wheat nitrogen status[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(1): 155–159
[16] 胡昊, 白由路, 杨俐苹, 等. 基于SPAD-502与GreenSeeker的冬小麦氮营养诊断研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 748–752
Hu H, Bai Y L, Yang L P, et al. Diagnosis of nitrogen nutrition in winter wheat (*Triticum aestivum*) via SPAD-502 and GreenSeeker[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 748–752
[17] 党蕊娟, 李世清, 穆晓慧, 等. 施氮对半湿润农田夏玉米冠层氮素及叶绿素相对值(SPAD值)垂直分布的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 54–59
Dang R J, Li S Q, Mu X H, et al. Effect of nitrogen on vertical distribution of canopy nitrogen and chlorophyll relative value (SPAD value) of summer maize in sub-humid areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 54–59
[18] 李鹏程, 董合林. 叶绿素仪在棉花氮肥推荐中的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(21): 92–97
Li P, Dong H. A review on chlorophyll meter application on nitrogen fertilizer recommendation for cotton[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(21): 92–97
[19] 李刚华, 丁艳锋, 薛利红, 等. 利用叶绿素计(SPAD-502)诊断水稻氮素营养和推荐追肥的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 412–416
Li G H, Ding Y F, Xue L H, et al. Research progress on diagnosis of nitrogen nutrition and fertilization recommendation for rice by use chlorophyll meter[J]. Plant Nutrition & Fertilizing Science, 2005, 11(3): 412–416
[20] 童淑媛, 宋凤斌. SPAD值在玉米氮素营养诊断及推荐施肥中的应用[J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(2): 233–238
Tong S, Song F. Application of SPAD value on N nutritional diagnosis and fertilization recommendation[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2009, 25(2): 233–238
[21] 张福锁. 测土配方施肥技术要览[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006
Zhang F Q. A Review of Soil Testing and Fertilizer Recommendation Technique[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006
[22] 陈新平, 张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 中国农业大学出版社, 2006
Chen X P. Zhang F S. Theory and Practice of Integrated Management of Nutrient Resources in Wheat-Maize Rotation System[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006
[23] 王涛, 刘洋, 左月明. 作物氮营养无损诊断研究进展[J]. 农业研究与应用, 2013, (6): 56–60
Wang T, Liu Y, Zuo Y M. Research progress in non-destructive diagnosis of crop nitrogen nutrition[J]. Agricultural Research and Application, 2013, (6): 56–60
[24] 王娟, 危常州, 万丹, 等. 应用灰板校正提高计算机视觉预测棉花植株含水量的精确度[J]. 棉花学报, 2015, (3): 275–282
Wang J, Wei C Z, Wan D, et al. Gray broad calibration may increase precision in the prediction of cotton water content based on computer version[J]. Cotton Science, 2015, (3): 275–282